

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových  
inženýrských studií

Měření úhlové odchylky od svislého směru s použitím  
3D snímače zrychlení.

Measuring tilt using 3D accelerometer.

Vladislav Chechelev

Studijní program:	B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	2612R011 Elektronické informační a řídicí systémy
Pracoviště:	Ústav mechatroniky a technické informatiky Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií  Technická univerzita v Liberci Studentská 2, 461 17 LIBEREC 1
Vedoucí práce:	Doc. Ing. Petr Tůma, CSc
Konzultant:	Ing. Pavel Pírk

Rozsah bakalářské práce:	
Počet stran:	42
Počet obrázků:	32
Počet tabulek:	4

Zadání

(vložit oboustranný list se zadáním od fakulty)

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem Technické univerzity v Liberci, která má právo požadovat ode mne přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do její skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: V Liberci 5.5.2008

Podpis:

## Poděkování

Dovoluji si touto cestou poděkovat vedoucímu této bakalářské práce Doc.Ing. Petru Tůmovi, CSc za cenné rady a připomínky. Dále děkuji panu Doc.Ing. Zdeňku Plívovi Ph.D. za poskytnutí potřebných informací o tištěných spojích.

## Abstrakt

Pomocí tříosého snímače zrychlení lze měřit úhlovou odchylku od svislého směru. Cílem této bakalářské práce bylo prostudovat dostupnou dokumentaci o mikroelektromechanických snímačích zrychlení. Vybrat vhodný typ akcelerometru, navrhnout s ním modul, který by řešil sběr a zpracování dat ze senzoru. Realizovat interface mezi USB a tímto modulem, a vytvořit aplikaci pro PC, která by předváděla možnosti měření a vlastnosti naměřených hodnot.

Pro realizaci modulu se snímačem zrychlení byl vybrán akcelerometr MMA7260 od Freescale. Pro realizaci interface mezi USB a tímto modulem jsem použil mikrokontroler PIC18F2550. O shromažďování a vizualizaci naměřených dat se stará program pro PC.

## Abstract

Is possible to measure tilt using three axis accelerometer. The aim of my thesis was: to find approachable information about microelectromechanical sensors of acceleration, to select applicable accelerometer and construct device with him. To create interface between this device and USB to communicate with PC and demonstrate received data.

Accelerometer MMA7260 by Freescale was chosen for device. For USB to serial link convertor was used PIC18F2550 microcontroller. Program for PC deals collecting and visualisation of measured data.

# **OBSAH**

<b>1. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>7</b>
1.1 ÚVOD .....	7
1.2 NEJPOUŽIVANĚJŠÍ TYPY SENZORŮ ZRYCHLENÍ .....	11
1.2.1 PIEZOELEKTRICKÉ AKCELEROMETRY .....	11
1.2.2 PIEZOREZISTIVNÍ AKCELEROMETRY .....	12
1.2.3 TEPELNÉ AKCELEROMETRY .....	12
1.2.4 KAPACITNÍ AKCELEROMETRY .....	13
1.3 VÝBĚR AKCELEROMETRU .....	16
1.3.1 AKCELEROMETRY FIRMY FREESCALE .....	16
1.3.2 AKCELEROMETRY FIRMY ANALOG DEVICES .....	17
1.3.3 POROVNÁNÍ VYBRANÝCH AKCELEROMETRŮ .....	18
1.4 PROBLEMATIKA MĚŘENÍ ODCHYLKY OD SVISLICE .....	19
<b>2. PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>22</b>
2.1 HARDWARE MODULU S AKCELEROMETREM .....	27
2.2 SOFTWARE MODULU S AKCELEROMETREM .....	28
2.3 HARDWARE PŘEVODNÍKU MEZI USB A SÉRIOVOU LINKOU .....	29
2.4 SOFTWARE PŘEVODNÍKU MEZI USB A SÉRIOVOU LINKOU .....	30
<b>3. VÝSLEDKY .....</b>	<b>35</b>
3.1 POPIS PROGRAMU PRO PC .....	35
3.2 UKÁZKY NAMĚŘENÝCH HODNOT .....	37
<b>4. ZÁVĚR .....</b>	<b>40</b>
<b>5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>41</b>

## **Seznam použitých zkratk**

LGA	Land Grid Array (typ pouzdra)
QFP	Quad Flat Package
SOT23	Small Outline Transistor
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EUSART	Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
I2C	Inter-Integrated Circuit (typ sběrnice)
SPI	Serial Peripheral Interface Bus
A/D	analogově-digitální
C/V	převodník kapacity na volty
DSP	Digital Signal Processor
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systeme
API	Application Programming Interface
HID	Human Interface Device (typ USB komunikace)
CDC	Communication Device Class
LDO	Low Drop Out
ICSP	In Circuit Serial Programming
OTP	One Time Programming

# TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Úvod

V současné době rozvoj, který zaznamenala mikromechanická technologie ve vývoji moderních pohybových senzorů, zpřístupnil pro široké použití levná a poměrně přesná čidla. Jedná se zejména o nové akcelerometry a gyroskopy vyrobené pomocí MEMS technologie, které lze s výhodou využívat například pro měření polohy, vibrací nebo pohybu v nejrůznějších oblastech lidské činnosti.

Už teď mikromechanické senzory nacházejí široké uplatnění v praxi, zejména v robotice, automatizaci, při měření vibrací a otřesů (kontrolují chod stroje, a pomáhají tak predikovat možné zadrhnutí ložisek), v navigačních a bezpečnostních systémech, polohovacích zařízeních, spotřební elektronice, seismografech, elektronických zařízeních (například pro detekci jejich volného pádu), apod.

Velkého rozšíření se dočkaly také v automobilovém průmyslu: v systémech ABS (Anti-lock braking systém), ESP (Electronic Stability Program), v systémech aktivace airbagů a brzdových světel [1], apod.

V některých oblastech, například v biomechanice - při snímání pohybu končetin, a ve zdravotnictví - v kardiostimulátorech, se tyto senzory už dávno staly nepostradatelnými. Klasickým příkladem toho, jak současný vývoj a miniaturizace mikromechanických senzorů pomáhá konstruktérům realizovat své ideje, může být svalový neurostimulátor. Dřívější modely těchto stimulátorů používaly kapalinové měřiče náklonu (které kvůli pleskající se kapalině dovolovaly jen pomalou chůzi), nebo senzory s pohyblivou kuličkou uvnitř, sloužící jako přepínač (které nedovolovaly chůzi po nakloněné rovině) [2]. S pokrokem v oblasti vývoje senzorů zrychlení tyto problémy přestaly být aktuální.

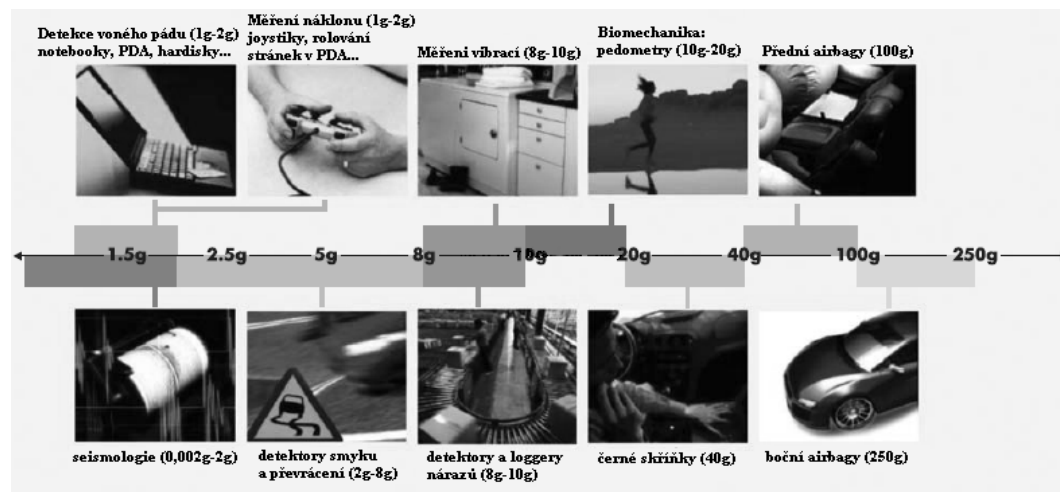
Akcelerometry se stávají velmi dostupnými a poskytují konstruktérům nové možnosti při realizaci svých nápadů. Limitujícím faktorem použití akcelerometrů v nejrůznějších aplikacích v praxi jsou fyzikální zákony. Tak například, dle [3], v systémech automatického narovnání konstrukcí, ve kterých se počítá s vysokou přesností (<1%) a teplotní stabilitou, jsou současně rozšířené senzory (s chybou



minimálně  $\pm 3^\circ$  a s poměrně velkou teplotní závislostí) svými parametry stále nedostačující. Také se současnými dostupnými akcelerometry není možné realizovat třeba navigační systém bez pomoci dalších systémů (např. GPS) a nutnosti časté korekce naměřených hodnot. Je to způsobeno dlouhou dobou integrace, při které kvůli nepřesnostem samotného senzoru, integrátorů, teplotních kompenzací apod., dochází k narůstání chyby, která při druhé integraci ještě roste s kvadratickou závislostí. „I v případě že přesnosti akcelerometrů budou několiksetkrát větší než jsou teď, takto vzniklé chyby budou stále obrovské.“[3]

Účelem této bakalářské práce bylo pomocí snímače zrychlení měřit úhly natočení tělesa, tedy k měření statického (tj. neměnného), nebo pomalu se měnícího zrychlení o rozsahu  $\pm 1g$ . Což je aplikace fyzikálně realizovatelná, která neklade na senzor moc velké požadavky. Mohl jsem tedy bez obav vybírat z velkého množství nabízených senzorů.

Nejprve však, pro lepší pochopení důležitých vlastností, zjištění současné technologické úrovně a tendencí její vývoje, bylo nutné prostudovat dostupnou dokumentaci o typech, vlastnostech a principech na kterých jednotlivé druhy pracují.



Obr.1: Příklady využití akcelerometrů (zdroj freescale.com)

## 1.2 Nejpoužívanější typy senzorů zrychlení

V praxi se nejčastěji setkáváme se čtyřmi druhy akcelerometrů, lišících se svými vlastnostmi, dostupností a cenou.

- **piezoelektrické akcelerometry**
- **piezoresistivní akcelerometry**
- **tepelné akcelerometry**
- **akcelerometry s proměnnou kapacitou**

### 1.2.1 Piezoelektrické akcelerometry

Piezoelektrický akcelerometr se obvykle skládá z piezoelektrického materiálu připevněného k seismické hmotnosti. Jestliže je akcelerometr vystaven zrychlení (např. vibracím nebo otřesům), je generovaná síla  $F$ , která bude působit na piezoelektrický element, který začne vytvářet náboj, resp. napětí na výstupu senzoru. Podle druhého pohybového zákona je tato síla přímo úměrná zrychlení a hmotě. Piezoelektrický efekt tak generuje na výstupu náboj  $q$  úměrný působící síle. Protože seismická hmota má konstantní hmotnost, výstupní signál v podobě náboje je úměrný zrychlení senzoru. „Díky použití piezoelektrických materiálů tyto senzory mají poměrně vysokou rezonanční frekvenci  $\omega_0$  a umožňují tak měření proměnného zrychlení až do frekvence kolem 250kHz a vysokého dynamického zrychlení (až 20000g)“ [4]. Nemohou však být použity při měření zrychlení s frekvencí nižší než 0,1Hz (statického zrychlení).

## 1.2.2 Piezorezistivní akcelerometry

Piezorezistivní akcelerometr je senzor, využívající piezorezistivní materiál (materiál měnící svou vodivost při mechanickém namáhání), rozdílný od piezoelektrických převádí sílu vzniklou urychlovanou hmotností na změnu odporu. Oproti piezoelektrickým - piezorezistivní akcelerometry mají tu výhodu, že mohou měřit i statickou akceleraci, tj. frekvenci změn již od 0 Hz. Tyto senzory jsou obvykle tvořeny piezorezistivním nosníkem ke kterému je připevněno závaží. Při působení zrychlení bude mít tato hmota tendenci setrvávat v klidu a silovým působením deformovat piezorezistivní materiál. Míra změny elektrické vodivosti je pak úměrná jeho deformaci. Piezorezistivní akcelerometry se vyznačují vysokou citlivostí a velkým frekvenčním pásmem se spodní hranicí měřitelnosti blízkou nule. Poskytují lineární výstup v celém měřicím rozsahu. Samotný princip měření změny odporu umožňuje jeho jednoduché zpracování bez nutnosti použití složitých elektronických obvodů. Nevýhodou je teplotní závislost daná rozdílnou vodivostí křemíku při různých teplotách. Díky svým vlastnostem tyto senzory nacházejí uplatnění v průmyslových aplikacích, automobilovém průmyslu, vojenství a kosmonautice. Zatím se však na trhu nedočkaly tak velkého rozšíření, jak je tomu v případě akcelerometrů pracujících na principu měření proměnné kapacity.

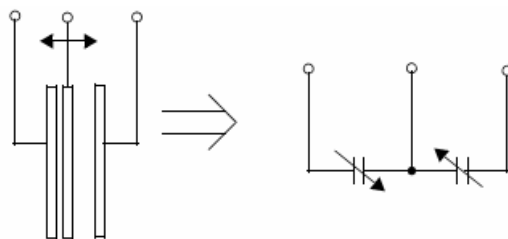
## 1.2.3 Tepelné akcelerometry

Poměrně zajímavým a podle mě perspektivním typem jsou tepelné akcelerometry, využívají ke svému měření přenos tepla v plynu a snímání rozložení teploty v okolí zdroje tepla. Topné tělísko zahřívá ve svém okolí plyn (vzduch) na konstantní teplotu. Při zrychlení dochází k posuvu „oblaku“ zahřátého vzduchu proti směru pohybu senzoru. Rozložení teploty je měřené jednoduchými teplotními snímači. Celý senzor, včetně vyhodnocovací elektroniky, tak může být integrován v jednom pouzdře. Svou konstrukcí patří tyto senzory k nejspolehlivějším sensorům zrychlení vůbec. Nedají se totiž zničit přetížením. Mají však jednu nevýhodu, a tou je velká teplotní závislost, kterou je nutné kompenzovat. V poslední době se senzory tohoto typu začaly objevovat volně v prodeji, nejznámějším výrobcem je firma Memsic [5].

## 1.2.4 Akcelerometry s proměnnou kapacitou

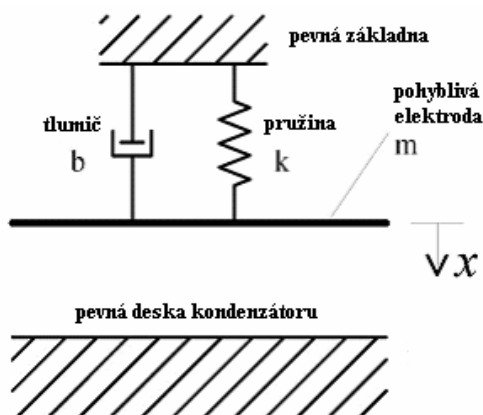
Akcelerometry s proměnnou kapacitou patří k nejpoužívanějším v běžné praxi. A jsou to právě ty senzory, které nás budou nejvíce zajímat.

Obecně lze říci, že k měření zrychlení tyto senzory používají deskový kondenzátor s pohyblivou elektrodou, viz obr.2.



*Obr.4: Schematické znázornění kondenzátoru  
s pohyblivou elektrodou*

Při působení zrychlení na střední (posuvnou) elektrodu se nepatrně změní poměr kapacit kondenzátoru, tuto změnu lze změřit a vyvodit z ní velikost zrychlení.

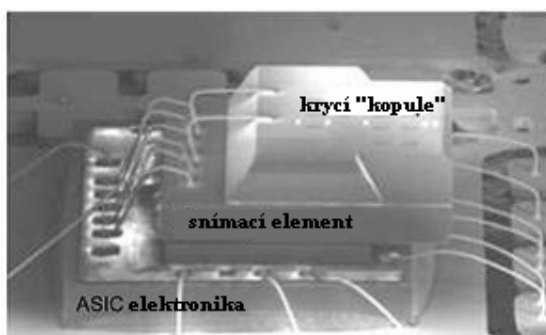


*Obr.5: Model deskového  
kondenzátoru  
s jednou pohyblivou elektrodou*

Desky kondenzátoru s jednou pevnou a druhou pohyblivou elektrodou lze modelovat následujícím způsobem viz. obr.5.

Měření kapacity už však není tak jednoduchou záležitostí, jak je tomu v případě piezorezistivních senzorů, u kterých měříme jen změnu odporu. K měření kapacity je

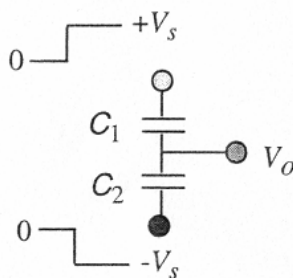
potřeba speciální elektroniky. Moderní výrobní postupy dovolují integraci mikromechanických senzorů spolu s elektronikou, potřebnou pro zpracování signálů, v jednom pouzdře. A to díky MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) technologiím. Pod tímto pojmem se míní velmi sofistikované umístění elektronických, ale především mikromechanických prvků. V souvislosti s těmito produkty se hovoří o systému na čipu nebo také o inteligentním snímači, protože je v něm přítomen jak mechanický subsystém (nutný pro transformaci fyzikální podstaty na elektrickou veličinu), tak elektronický subsystém zajišťující následné zpracování, neboli postprocessing (zesílení, filtraci, teplotní kompenzaci aj.).



Obr.6: Fotografie mikromechanické části akcelerometru MMA7260

(zdroj: freescale.com)

Pevné elektrody kondenzátoru jsou napájeny symetrickým napětím, viz. obr.6.



Obr.6: Napájení nepohyblivých elektrod kondenzátoru.

Pro výpočet napětí  $V_0$  na pohyblivé prostřední elektrodě kondenzátoru, na pevné elektrody kterého přivádíme symetrické napětí  $+V_s$  a  $-V_s$  platí vztah:

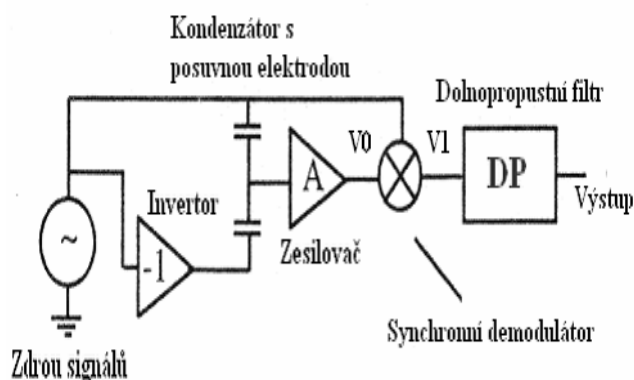
$$V_0 = -V_s \frac{C_{s1}}{C_{s1} + C_{s2}} 2V_s = \frac{C_{s1} - C_{s2}}{C_{s1} + C_{s2}} V_s \quad (1)$$

Za předpokladu, že plochy kondenzátoru jsou stejné, lze vztah (1) upravit na vztah (2) kde,  $G_1$  a  $G_2$  jsou mezery mezi deskami diferenčního kapacitou.

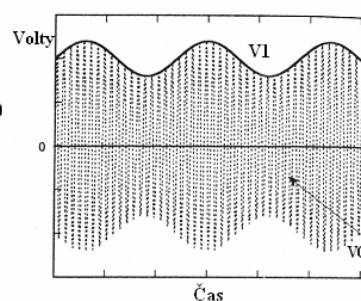
$$V_0 = \frac{G_2 - G_1}{G_1 + G_2} V_s \quad (2)$$

Výsledkem přivedení napětí  $V_s$  na pevné elektrody kapacitou však dojde ke vzniku elektrostatické síly, která začne posouvat pohyblivou elektrodu. Proto se k napájení proměnných kondenzátorů používá velmi krátkých budících pulsů, měření tak bude provedeno rychleji než se změní poloha střední elektrody.

K měření kapacity v akcelerometrech se obvykle používá následujícího zapojení:

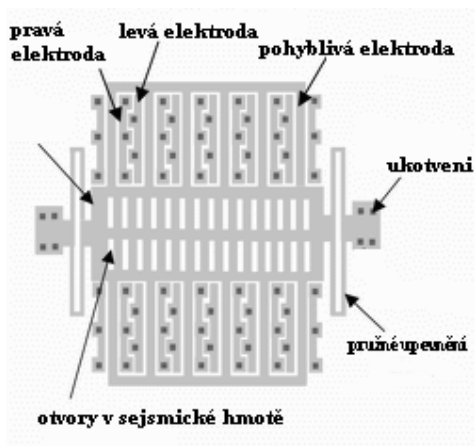


Obr.7: Schéma obvodu pro zpracování signálu z kondenzátoru s pohyblivou elektrodou.



Obr.8: Průběh napětí na výstupu synchronního demodulátoru.

Na kondenzátor s proměnnou kapacitou jsou přiváděny bipolární signály, napětí vzniklé na pohyblivé elektrodě je snímáno, zesilováno a následně namodulováno synchronním demodulátorem, na který přivádíme modulovanou nosnou a pulzující signál (ten, který je přiváděn na pevné elektrody kapacitou), viz obr. 8. Na výstupu pak máme spojitý signál úměrný výchylce pohyblivé elektrody. Některé akcelerometry používají zpětnou vazbu (přivádějí výstupní signál zpět na budící elektrody kapacitou a tím na nich vytvářejí elektrostatickou protisílu) pro linearizaci výstupního signálu a obvody teplotní kompenzace pro zmenšení teplotní závislosti senzoru, která je u akcelerometrů s proměnnou kapacitou značná.



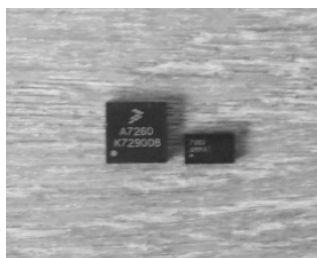
Obr.9: Provedení kondenzátoru s pohyblivou elektrodou v akcelometru MMA7260

## 1.3 Výběr akcelometru

Vzhledem k tomu, že v zadání práce bylo vybrat vhodný typ snímače 3D zrychlení od firem Analog Devices a Freescale (a tyto firmy vyrábějí jen akcelerometry využívající principu měření proměnné kapacity), dále už jsem volil jen mezi senzory pracujícími právě na tomto principu.

### 1.3.1 Akcelerometry firmy Freescale

V době výběru senzorů v nabídce firmy Freescale byly jen dva tříosé akcelerometry, oba s analogovými výstupy: MMA7260 s nastavitelnou citlivostí (1.5g/2g/4g/6g) a MMA7261 (2.5g/3.3g/6.7g/10g). Věděl jsem, že se připravuje vedení na trh MMA7360L (1.5g / 6g) akcelometru ve, skoro o 60% menším, pouzdru LGA, s vylepšenou MEMS strukturou, zajišťující kratší reakční dobu (0,5ms místo 1ms u MMA7260), a větší frekvenční rozsah (300Hz v ose Z oproti 150Hz u MMA7260). Navíc disponujícím logickým výstupem, detekujícím nulové zrychlení 0g, a funkcí selftest umožňující poměrně jednoduše otestovat funkčnost senzoru.



Obr.10: Porovnání pouzder QFP a LGA akcelerometrů MMA7260 a MMA7455L

Uprostřed dubna roku 2008 se objevil zcela nový tříosý senzor MMA7455L s digitálním (I2C/SPI) výstupem, řízený integrovaným spolu se senzorem v pouzdru LGA, DSP procesorem, zajišťujícím kompenzaci, samotestování, sériovou komunikaci, a nabízejícím spoustu užitečných funkcí jako např.: softwarová volba rozsahu či určení typu měření (měření polohy nebo vibrací). K řízení akcelerometru by nebylo nutné používat procesor. Odpadla by nutnost použití dražšího mikrokontroleru s A/D převodníkem, a mohli bychom využít např. levné mikrokontrolery rodiny PIC10 v pouzdru SOT23. Tyto senzory se však objevily pro mě příliš pozdě, proto jsem se musel spokojit se senzorem MMA7260.

### 1.3.2 Akcelerometry firmy Analog devices

Nabídka mikromechanických iMEMS senzorů zrychlení firmy Analog devices je zastoupena dvěma řadami: ADXL a ADIS. Řada ADXL nabízí širokou škálu senzorů, viz. Tab.1, určených pro nejrůznější typy aplikací.

Tab.1: Akcelerometry řady ADXL firmy Analog Devices

ADXL Low-g Accelerometer Selection Table													
Part #	# of Axes	Range (g)	Sensitivity	Sensitivity Accuracy (%)	Output Type	**Max Bandwidth (kHz)	Noise Density ( $\mu g/\sqrt{Hz}$ )	Voltage Supply (V)	Supply Current (mA)	Temperature Range (°C)	Package	Status	Price* (1000-4999)
ADXL103	1	$\pm 1.7$	1000 mV/g	$\pm 6$	Analog	2.5	110	5 (3 to 6)	0.7	-40 to +125	E-8	Production	\$7.75
ADXL203	2	$\pm 1.7$	1000 mV/g	$\pm 6$	Analog	2.5	110	5 (3 to 6)	0.7	-40 to +125	E-8	Production	\$12.00
ADXL204	2	$\pm 1.7$	620 mV/g	$\pm 5$	Analog	2.5	170	3.3 (3 to 6)	0.5	-40 to +125	E-8	Production	\$12.00
ADXL213	2	$\pm 1.2$	30 %/g	$\pm 10$	PWM	2.5	160	5 (3 to 6)	0.7	-40 to +85	E-8	Production	\$9.70
ADXL320	2	$\pm 5$	174 mV/g	$\pm 10$	Analog	2.5	250	2.4 to 6	0.5	-20 to +70	CP-16	Production	\$3.75
ADXL321	2	$\pm 18$	57 mV/g	$\pm 10$	Analog	2.5	320	2.4 to 6	0.5	-20 to +70	CP-16	Production	\$3.75
ADXL322	2	$\pm 2$	420 mV/g	$\pm 10$	Analog	2.5	220	2.4 to 6	0.5	-20 to +70	CP-16	Production	\$3.75
ADXL330	3	$\pm 2$										Prerelease	
ADXL311	2	$\pm 2$	174 mV/g	$\pm 15$	Analog	6	300	2.4 to 5.25	0.4	0 to +70	E-8	Phase Out	\$4.25
ADXL202	2	$\pm 2$	12.5 %/g	$\pm 16$	PWM	6	200	3 to 5.25	0.6	-40 to +85	E-8	Phase Out	\$8.50
ADXL210	2	$\pm 10$	4.0 %/g	$\pm 20$	PWM	6	200	3 to 5.25	0.6	-40 to +85	E-8	Phase Out	\$8.50



Řada ADIS pak nabízí senzory, s digitálními výstupy a vylepšenými vlastnostmi, určené pro aplikace, ve kterých se vyžaduje větší přesnost, a ve kterých nezáleží tolik na ceně.

K mému překvapení v nabídce low-g akcelerometrů jsem našel jen jeden tříosý senzor ADXL330.

### 1.3.3 Porovnání vlastností vybraných akcelerometrů

Horní hranice pásma měřitelnosti je určena první **rezonanční frekvencí** celé mechanické struktury. Při překročení hodnoty této frekvence akcelerometr již prakticky neměří. Tato hodnota je pak ještě limitována dobou potřebnou pro zpracování signálu interní elektronikou a udává se hodnotou **frekvenčního rozsahu**. Další důležitou vlastností je **nelinearita** a tzv. **cross-sensitivity** (křížová citlivost- např. akcelerometr měřící v ose z, může parazitně měřit i zrychlení v osách x a y). Tato nevyžadovaná vlastnost je vyjádřena poměrem citlivosti v měřeném směru ku citlivosti ve ostatních směrech. Také jsou důležité **teplotní závislosti** a **maximální přetížení** (v případě, že by akcelerometr byl vystaven vysoké hodnotě zrychlení a hrozilo by tak, přílišným prohnutím, poškození mechanické části).

*Tab.2: Porovnání nejdůležitějších vlastností akcelerometrů MMA7260 a ADXL330*

	MMA7260	ADXL330	
rozsah	$\pm 1.5/2/4/6$	$\pm 3$	g
frekvenční rozsah, osy X,Y:	350	1600	Hz
frekvenční rozsah, osa Z:	150	550	Hz
rozsah napájecího napětí	2,2 – 3,6	1,8 – 3,6	V
odběr proudu	500 – 800	360	uA
nelinearita	1	0,3	% rozsahu
cross-sensitivity (křížová citlivost)	5	1	% rozsahu
vzorkovací frekvence	11	50	kHz
rezonanční frekvence	xy: 6, z: 3,4	5,5	kHz
teplotní koeficient	3 000	150	ppm/°C
teplotní offset	0,45	1	mg/ °C

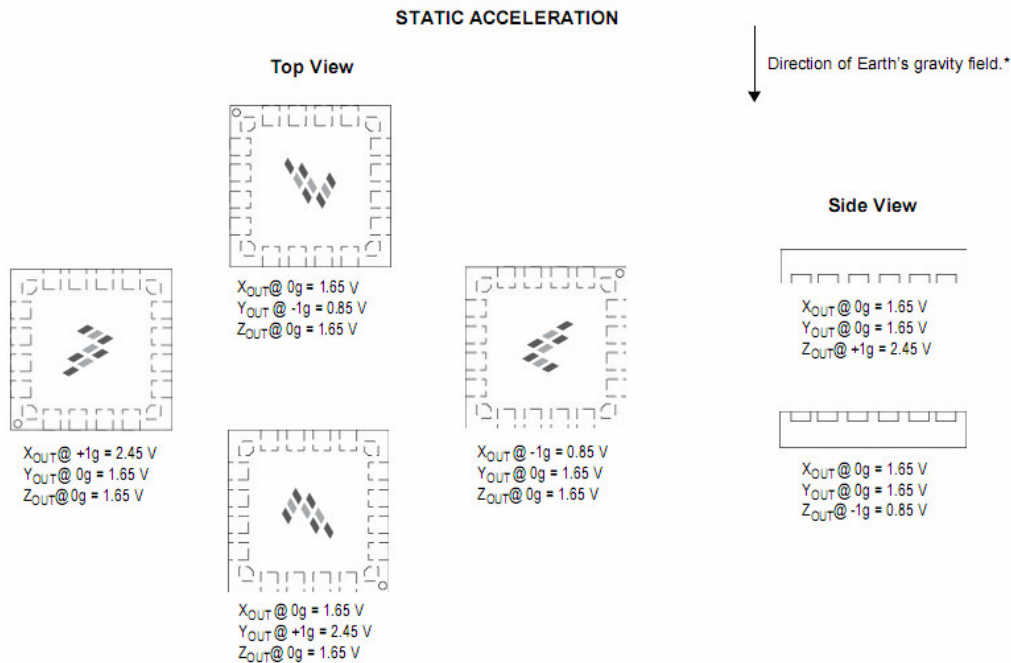
maximální přetížení	2 000	10 000	g
pouzdro	tqfp16, 6x6	lfmsp16, 4x4	mm
cena	1,8	5,45	\$ při >1000ks

Porovnání některých vlastností ukázalo, že ADXL330 disponuje lepšími parametry. Avšak vzhledem k dostupnosti a ceně senzorů (v době výběru součástky mohl přímý zástupce Analog devices prodat jen dva kusy ADXL330, kdežto firma Freescale nabízela vzorky své produkce) volba padla jednoznačně na akcelerometr MMA7260.

## 1.4 Problematika měření odchylky od svislice

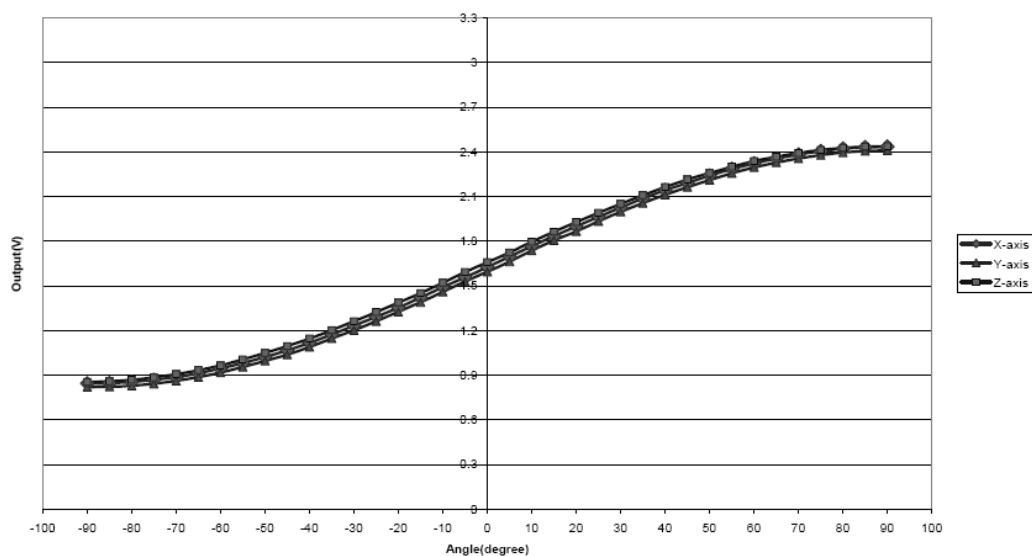
Akcelerometry se používají pro měření zrychlení dynamického (proměnného, např. při pohybu a nárazech), nebo statického (např. zrychlení způsobeného zemskou gravitací). Měření odchylky od svislice by tak mohlo být uskutečňováno měřením odchylky od směru působení zemské gravitace. Při měření statického zrychlení se předpokládá, že jeho maximální hodnota nepřesáhne 1g. Je třeba oddělovat složku statickou od dynamické, k oddělení obou složek se obvykle používá filtrace signálu volbou kondenzátoru v RC článků na výstupu senzoru.

Výstupem akcelerometru MMA7260 jsou analogové hodnoty napětí, vyjadřující míru natočení senzoru vůči směru působení zemské gravitace. Situace je názorně vysvětlena na obr.11.



*Obr.11: Výstupní napětí akcelerometru MMA7260 v závislosti na natočení senzoru vůči směru zemské gravitace kolem os X, Y, a Z.*

Kvůli změně síly působení gravitace na pohyblivou elektrodu v mikromechanické části, hodnota napětí na výstupu akcelerometru není lineárně závislá na úhlu natočení a má sinusoidální průběh, viz obr.12. Proto bylo nutné změřenou hodnotu přepočítávat na úhel.



*Obr.12: Závislosti napětí na výstupech X, Y a Z v závislosti na úhlu natočení.*

Dle dokumentace firmy Freescale, popisující způsob měření úhlů natočení senzoru [6], pro hodnotu výstupního napětí akcelerometru MMA7260 platí vztah (3).

$$U_{out} = U_{OFFSET} + \left( \frac{\Delta U}{\Delta g} \cdot 1g \cdot \sin \varphi \right) \quad (3)$$

kde:

$V_{out}$  - napětí na výstupech akcelerometru [V]

$V_{OFFSET}$  - napětí na výstupech akcelerometru při 0g [V]

$\frac{\Delta V}{\Delta g}$  - citlivost (pro rozsah 1,5g se hodnota citlivosti rovná 800 mV/g)

$\varphi$  - úhel, který svírá jedna z os akcelerometru se směrem působení zemské gravitace

Jednoduchou úpravou lze ze vztahu (3) získat vztah pro výpočet úhlu:

$$\varphi = \left( \frac{U_{OUT} - U_{OFFSET}}{\frac{\Delta U}{\Delta g}} \right) \quad (4)$$

V [6] je také uvedena tabulka s hodnotami arcsin a arccos pro případ měření osmibitovým analogově-digitálním (A/D) převodníkem, s cílem zjednodušení zpracování naměřených hodnot přímo v mikrokontroleru.

Pro rozlišovací schopnost A/D převodníku platí vztah (5).

$$\Delta[V] = \frac{1}{2^b - 1} \cdot U_{max} \quad (5)$$

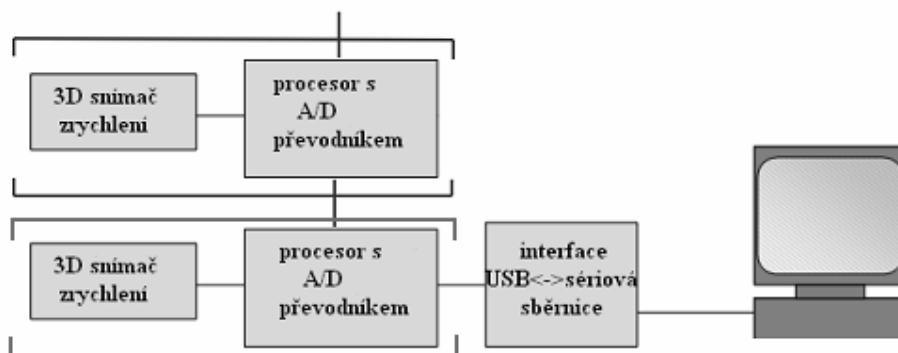
Osmibitový A/D převodník tak dokáže rozdělit napětí 3V na 255 dílku po 12mV na krok. Vzhledem k tomu, že při měření statického zrychlení se napětí na výstupech akcelerometru pohybuje v rozmezí 0,85V až 2,45V, je rozdělováno nikoliv napětí 3V, ale jen 1,6V do 136 kroků. Pro zjištění možností měření, které dovoluje senzor

MMA7260, byl použit desetibitový A/D převodník s referenčním minimem v 0,85V a maximem v 2,45V. Tím bylo dosaženo rozdělení úhlu 180° do 1023 kroků, tj. na plný rozsah převodníku.

## PRAKTICKÁ ČÁST

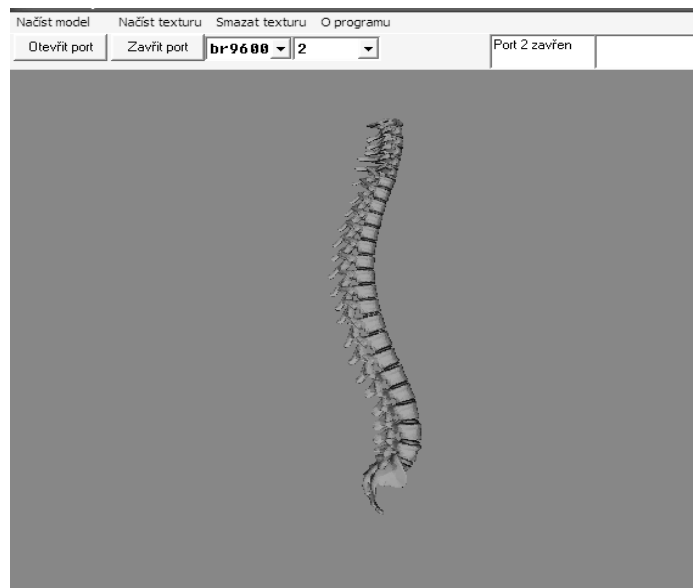
### 2.1 Hardware modulu s akcelerometrem

Požadavek modulární koncepce přípravku s akcelerometrem předpokládal použití speciálního rozhraní, řešícího mimo jiné také napájení modulů. Nejjednodušším řešením bylo využít napájení přímo z USB portu hostitelského PC. Toto řešení a vybraný typ akcelerometru pak přímo ovlivnily výběr všech polovodičových součástek.



Obr.13: Schéma propojení přípravků s PC pomocí USB převodníku.

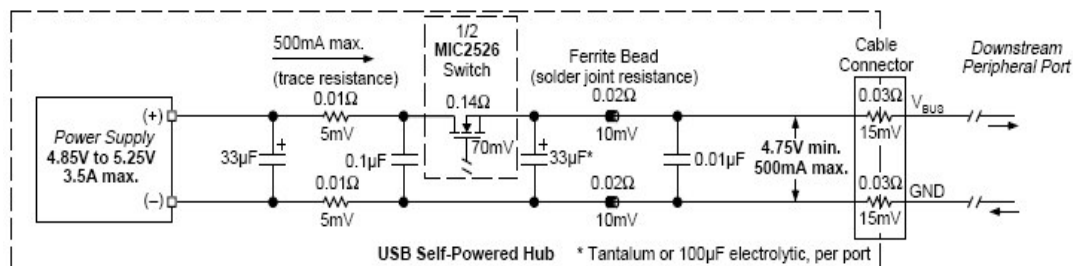
Modulární řešení dovoluje řazení desek s akcelerometry za sebou s cílem možnosti využití těchto modulů v budoucnu při měření křivosti lidské páteře (obr.14).



Obr.14: Model lidské páteře zobrazený předváděcím programem.

Jelikož výstupem, vypovídajícím o hodnotě zrychlení, akcelerometru MMA7260 je analogová hodnota napětí, bylo nutné použít mikrokontroler s desetibitovým A/D převodníkem. Pro napájení modulů připadaly v úvahu dvě možnosti: použít externí zdroj napětí nebo odebírat proud přímo z USB portu PC. Byla vybrána druhá varianta.

Dle specifikace [7] je z USB sběrnice dovoleno zařízením typu High-power device (např. USB rozbočovače) odebírat maximálně 500mA, pro ostatní zařízení (Low-power devices) je maximální hodnota jen **100mA**. To by mělo stačit pro napájení převodníku a modulů, přesto však jedním z kritérií návrhu byla minimalizace celkové spotřeby zařízení.

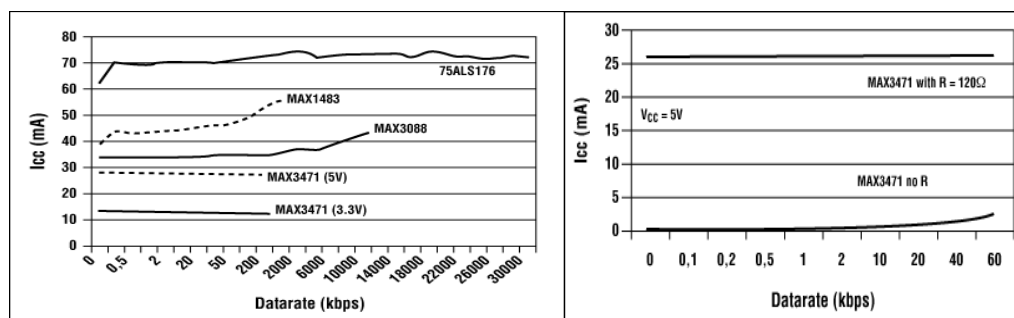


Obr.15: Schéma USB portu PC dle specifikace Intel.

Proto byl vybrán nízkovoltážní nízkopříkonový mikrokontroler PIC18LF2550 s desetibitovým analogově digitálním převodníkem. Tento mikrokontroler pracuje v širokém rozsahu napájecích napětí od 2V do 5,5V, a disponuje EUSART (Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) modulem.

Akcelerometr MMA7260 pracuje v rozmezí 2,2V až 3,3V a k jeho správné činnosti bylo potřeba upravit napětí 5V, poskytované po sběrnici USB převodníkem. Pro tento účel byl zvolen LDO regulátor MCP1700 na 3V s malým proudovým odběrem, vhodný pro bateriový provoz.

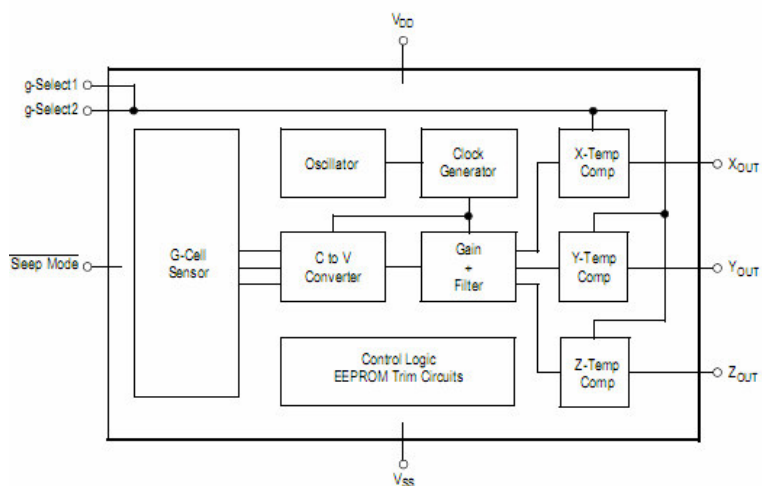
Pro větší spolehlivost přenosu dat byl sériový modul EUSART doplněn poloduplexním RS-485 transceiverem MAX3471. Tato součástka je určena speciálně pro bateriový provoz, ostatně, vystihující je její porovnání s jinými analogickými součástkami, na obr.16.



Obr.16: Grafy porovnání proudových odběrů MAX3471 s jinými součástkami tohoto typu, se zakončovacím rezistorem a bez něho.

Na obr.17 je znázorněno blokové schéma akcelerometru MMA7260. Kapacita na výstupu senzoru je nejprve C/V převodníkem převedena na volty. Dále způsobem, vysvětleným v popisu kapacitních akcelerometru je signál zesílen a odfiltrován. Bloky teplotní kompenzace kompenzují vlivy změn okolní teploty na kapacitu mikromechanického kondenzátoru s pohyblivou elektrodou. Bloky oscilátoru a generátoru hodinového signálu slouží pro řízení napájení stacionárních elektrod. Do bloku s EEPROM pamětí se ukládají hodnoty při kalibraci senzoru v továrně. Piny g-Select1 a g-Select2 se nastavuje citlivost akcelerometru ( $\pm 1,5g/2g/4g/6g$ ). Aktivací pinu

Sleep Mode senzor přechází do režimu spánku, v němž senzor odebírá proud 3uA, probouzení z tohoto režimu trvá maximálně 2ms.



Obr.17: Blokové schéma akcelerometru MMA7260

Pro případ sledování pomalých změn výrobce doporučuje filtrovat výstupní napětí kondenzátory 4,7uF (tab.3), v navrženém zařízení jsou pro tento účel použity kondenzátory 10uF (největší dostupná hodnota v pouzdře 0805).

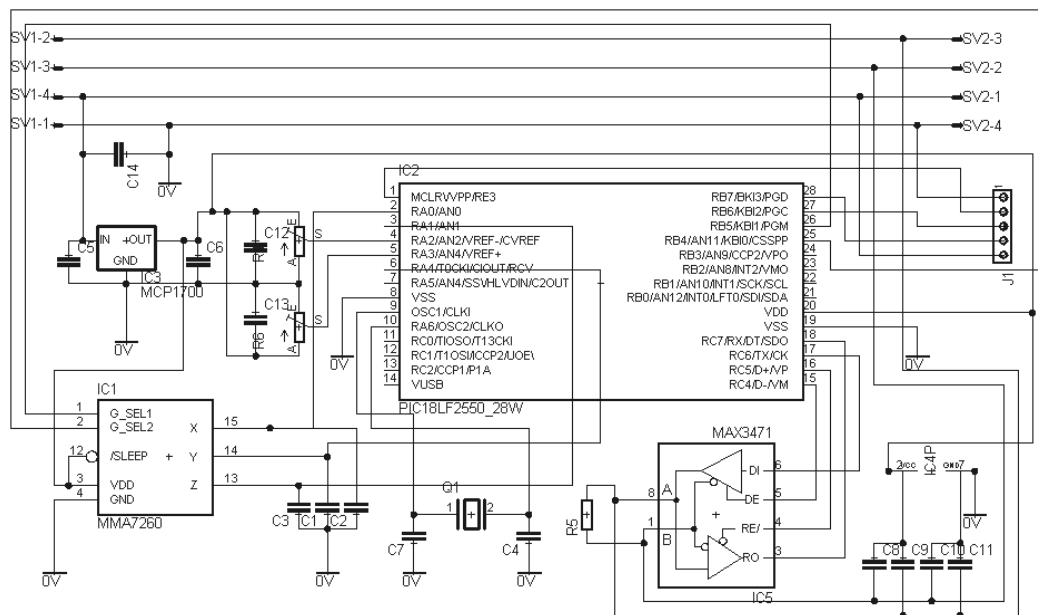
Tab.3: Doporučení výrobce pro výběr filtračních kondenzátorů:

Bandwidth (Hz)	Capacitor (μF)
1	4.7
10	0.47
50	0.10
100	0.05
200	0.027
500	0.01

Tab.4: Nastavení citlivosti akcelerometru MMA7260 v závislosti na kombinaci pinů g-Select1 a g-Select2:

g-Select2	g-Select1	g-Range	Sensitivity
0	0	1.5g	800 mV/g
0	1	2g	600 mV/g
1	0	4g	300 mV/g
1	1	6g	200 mV/g

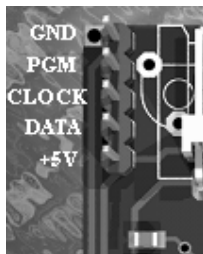




Obr.18: Schéma modulu s akcelerometrem

Na obr.18 je znázorněno schéma navrženého modulu s akcelerometrem. Pro taktování procesoru byla původně snaha využít interní 8MHz RC oscilátor. Jeho stabilita se však ukázala být nepostačující, nepomáhala ani jeho průběžná kalibrace a korekce během provozu (změnou hodnoty OSCTUNE), doporučená výrobcem[8]. Proto bylo nutné použít krystalový rezonátor.

V případě potřeby hardware zařízení dovoluje změnu citlivosti akcelerometru úpravou kombinace pinů g-Select1 a g-Select2. Piny potřebné pro naprogramování procesoru přímo v zapojení (ICSP- In Circuit Serial Programming) jsou vyvedeny na pětipinovém konektoru J1(obr.19).

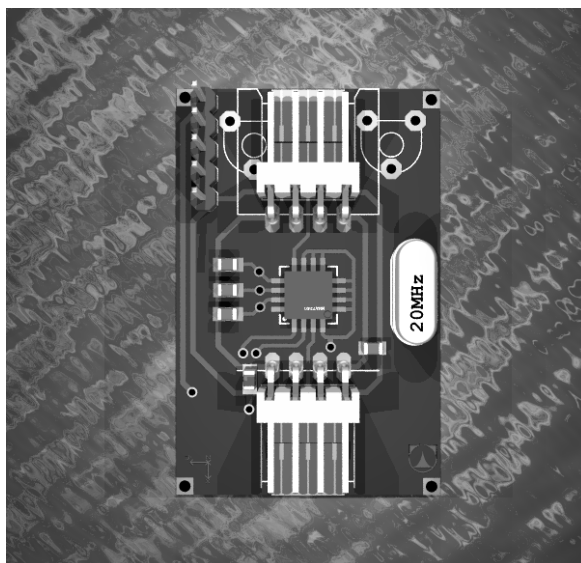


Obr.19: Detail konektoru pro programování procesoru

Hodnota napětí na výstupech akcelerometru se pohybuje v rozmezí 0,85V až 2,45V. Pomocí potenciometrů se nastavují referenční hodnoty napětí pro minimum (pin

VREF-) a maximum (pin VREF+) rozsahu A/D převodníku. Desetibitový A/D převodník tak poskytuje hodnoty v plném rozsahu 0 až 1023 bitů.

Deska plošných spojů byla navržena ve freeware verzi návrhového systému Eagle. Na obr.20 lze vidět výslednou podobu modulu vytvořenou v tomto programu pomocí skriptu Eagle3D.scr a vykreslenou programem POV-Ray (podrobný postup lze najít v [9]).

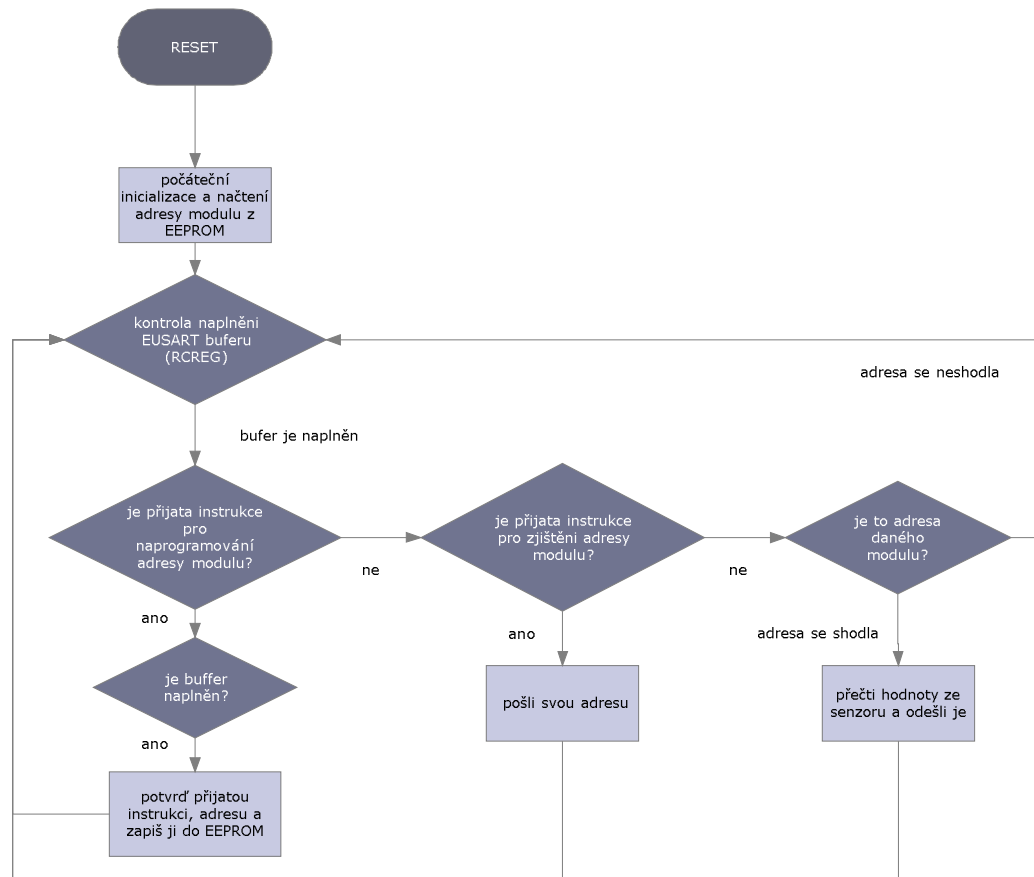


*Obr.20: Výsledná podoba modulu.*

## 2.2 Software modulu s akcelerometrem

Program pro mikrokontroler obstarává čtení hodnot z A/D převodníku po přijetí adresy, která se shoduje s adresou, kterou má mikrokontroler uloženou ve své paměti EEPROM. Pokud je přijata instrukce pro zápis adresy modulu do interní paměti, mikrokontroler jí nejprve potvrdí odesláním zpět do PC a pak přejde do stavu zápisu, ve kterém je přijatá hodnota adresy (jeden byte) zapsána do EEPROM. Podrobněji je činnost programu vysvětlena na obr.21.

## Vývojový diagram programu pro mikrokontroler v modulu s akcelerometrem



Obr.21: Vývojový diagram

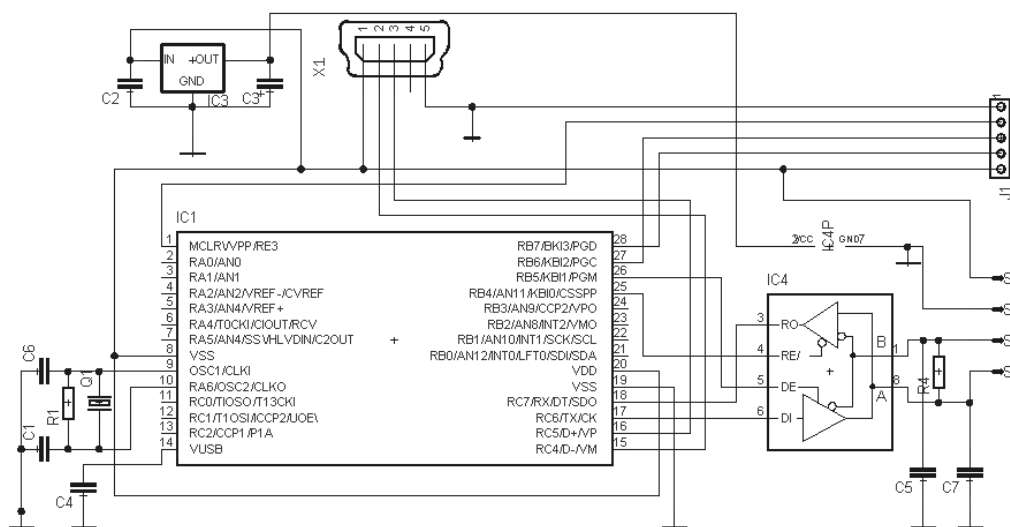
Formát odesílané informace je složen ze sedmi byte a vypadá následovně:

adresa modulu	osaX horních 8 bit	osaX dolní 2 bity	osaY horních 8 bit	osaY dolní 2 bity	osaZ horních 8 bit	osaZ dolní 2 bity
---------------	--------------------	-------------------	--------------------	-------------------	--------------------	-------------------

## 2.3 Hardware převodníku mezi USB a sériovou linkou

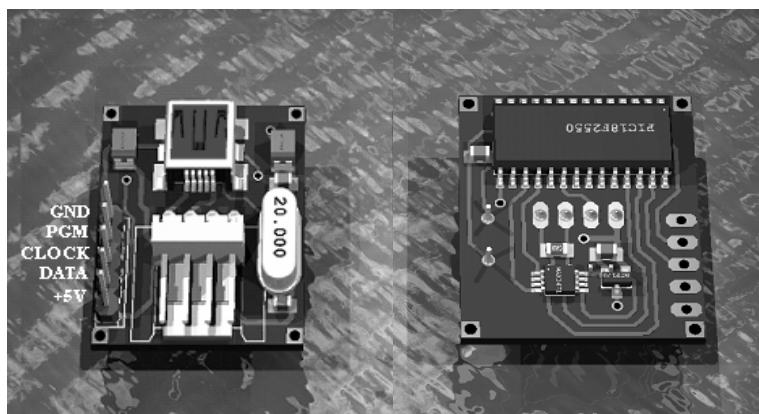
Při výběru součástky pro realizaci převodníku z USB na sériovou sběrnici jsem mohl zvolit jednu ze dvou možností. První možností bylo použít již hotový převodník

s USB. V úvahu připadaly: známý převodník FT232 od FTDI, PL-2303 od firmy Prolific, TUSB3210 od Texas Instruments, nebo CP2102 vyráběný firmou Silicon Laboratories. Zaujala mě však druhá možnost, a tou bylo použít mikrokontroler, který by v sobě obsahoval zabudovaný USB interface[10]. Pamatoval jsem totiž na mikrokontrolery PIC16C745 a PIC16C765 s čtrnáctibitovým instrukčním slovem, nepodporovaly sice standard USB2.0 a mohly pracovat jen jako zařízení typu HID (human interface device), ale pro daný typ aplikace (občasný sběr dat přes USB) se mi toto řešení zdálo být ideální. Mělo to však jednu vadu: tyto procesory nedisponují přeprogramovatelnou flash pamětí a mají místo ní OTP (One Time Programming) paměť, což by mi výrazně zkomplikovalo, anebo dokonce i znemožnilo návrh převodníku. Naštěstí se v nabídce firmy Microchip objevila nová řada osmibitových mikrokontrolerů s šestnáctibitovým instrukčním slovem a podporou USB. Jedná se o procesory PIC18F2550, PIC18F4455, PIC18F2455 a PIC18F2550. V době návrhu převodníku se nabídka osmibitových USB mikrokontrolerů ještě rozšířila o řadu PIC18FXXJ50. Zajímavé je, že třeba i PIC18F67J50 je stále levnější než mnou v říjnu vybraný PIC18F2550, který má čtyřikrát menší programovou paměť a skoro dvakrát menší datovou paměť RAM. V době uvedení těchto procesorů na trh a zveřejnění ovladačů na internetu však práce nad převodníkem s PIC18F2550 již byly v plném proudu.



Obr.22: Schéma převodníku z USB

Zařízení se skládá z procesoru PIC18F2550, převodníku MAX3471 a stabilizátoru MCP1700. Pro stabilizaci napětí pro USB sběrnici byl použit integrovaný v procesoru regulátor napětí na 3,3 V, výstup z tohoto stabilizátoru je také vyveden na pinu VUSB. Dle doporučení výrobce deska byla navržena se snahou minimalizovat vliv rušení na hodinové impulsy generované krystalem. Pro rozkmitávání krystalu 20MHz byly použity kondenzátory 15pF. Modul EUSART je nakonfigurován pro práci rychlostí 9600 baudů v asynchronním plně-duplexním režimu. Na obr.22 je schéma zařízení, na obr.23 je vidět výsledná podoba převodníku.



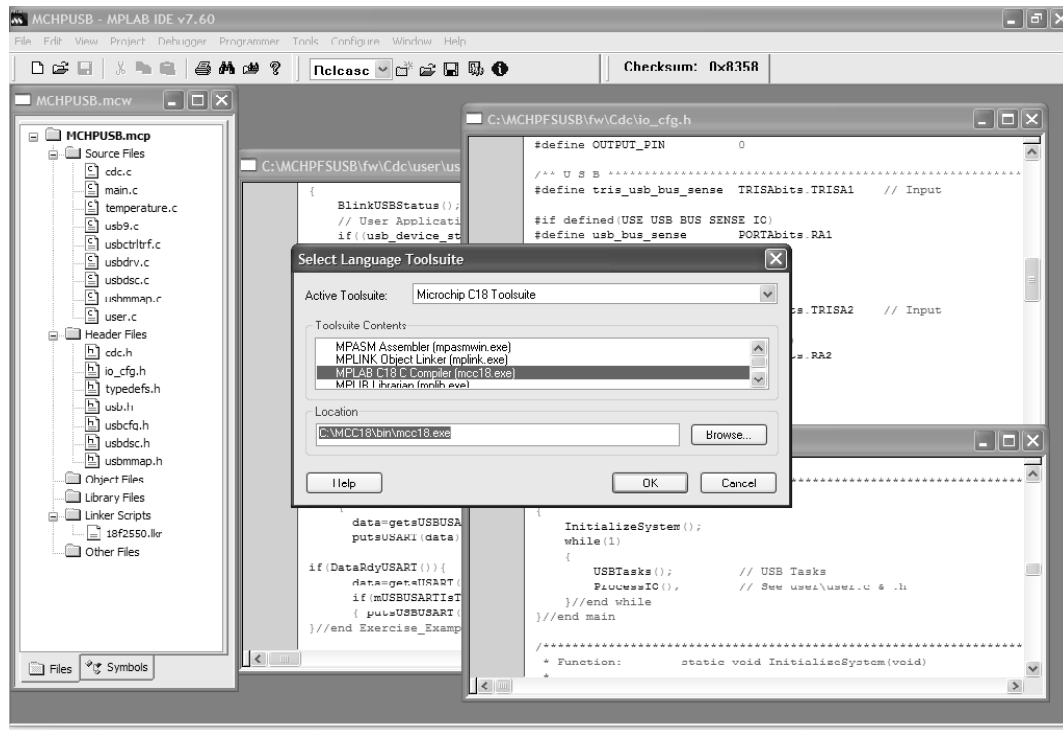
*Obr.22: Výsledná podoba převodníku z USB.*

## 2.4 Software převodníku mezi USB a sériovou linkou

Pomocníkem při psaní programu převodníku byla dokumentace a zdrojové kódy k vývojové desce PICDEM™ Full Speed USB demonstration board, obsahující projekty pro demonstraci funkčnosti této desky v různých režimech, zveřejněné na stránkách microchip [12].

Po nainstalování programu MCHPFSUSB.exe se ve složce c:\MCHPFSUSB\ objeví složka s projekty, dokumentací, programem a ovladači pro PC. S projekty se pracuje ve freeware vývojovém prostředí MPLAB, od Microchip. Program je psán pomocí kompilátoru C18 (studentská verze, nepodporující sice optimalizaci kódu, ale jinak zcela funkční je po registraci na microchip.com ke stažení zdarma). Po prvním

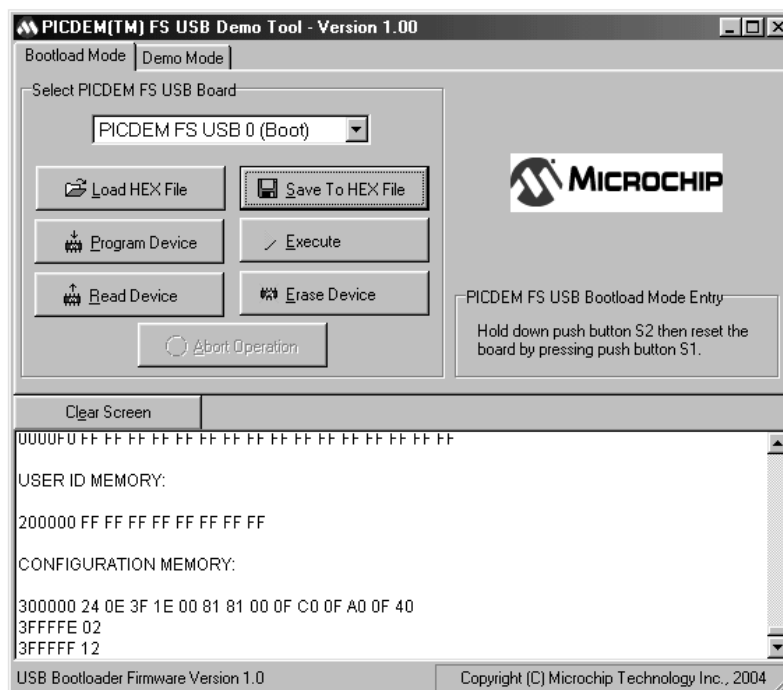
spuštění programu MPLAB je třeba nejprve zadat umístění kompilátoru, to se provede kliknutím v nabídce **Project-> Select language toolsuite** (viz obr.23)



*Obr.23: Okna vývojového prostředí MPLAB od firmy Microchip.*

Ve složce `c:\MCHPFSUSB\` jsou demonstrační příklady práce USB mikrokontrolerů v různých režimech komunikace jako např.: Bootloader, HID, CDC a zařízení s vlastním ovladačem.

**Bootloader:** tento program slouží pro programování mikrokontroleru přes USB a to tak, že se zapíše a přemaskuje resetovací vektory z adres `0x0000`, `0x0008` a `0x0018` na adresy `0x0800`, `0x0808` a `0x0818`. V mikrokontroleru, jednou naprogramovaném tímto programem, lze pak pohodlně modifikovat programovou a datovou paměť demonstračním programem FS USB Demo tool přes USB bez použití programátoru viz obr.24.



*Obr.24: Okno programu FS USB Demo tool, dovolujícího programování PIC18F2550 přes USB port mikrokontroleru.*

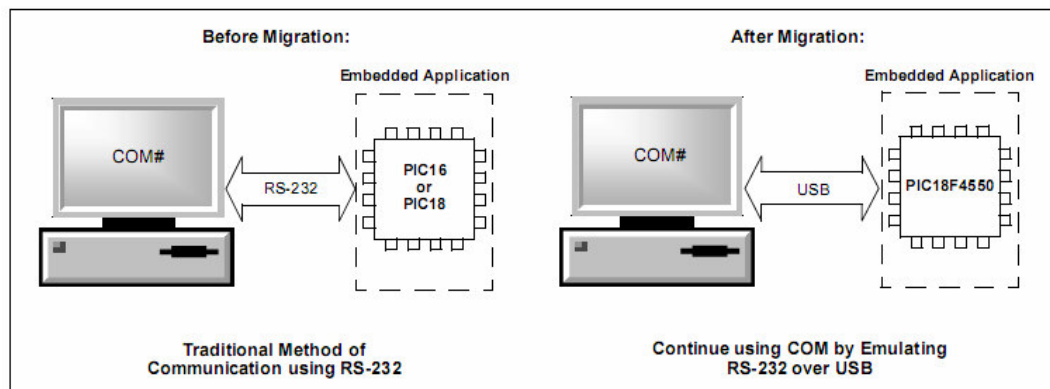
**Zařízení typu HID (human interface device):** Typickými zástupci této skupiny jsou vstupní a polohovací zařízení (klávesnice, myši), nejrůznější herní zařízení (joysticky, volanty). Ač se to možná nezdá, takové zařízení lze s výhodou používat i pro sběr dat ze senzorů (např. teploměrů), kdy poměrně nízká rychlost komunikace nebude vadit. Výhodou použití HID zařízení je, že není třeba psát ovladač pro hostitelský systém.

**Zařízení s vlastním ovladačem:** MCHPFSUSB framework obsahuje MCHPUSBAPI.dll soubor pro použití s univerzálním ovladačem mchpush.sys, využívajícím Win32 Api funkce, ve složce jsou také demonstrační programy pro hostitelský systém v jazyce C. Je to nejefektivnější a nejuniverzálnější způsob využití sběrnice. Při posílání velkých bloků dat se dařilo dosahovat rychlostí kolem 4Mb/s, limitujícím faktorem byla zřejmě omezená velikost paměti RAM mikrokontroleru.

**USB Mass Storage zařízení:** Mass Storage je standard pro paměťová zařízení připojovaná většinou přes USB, jde například o flash paměti, mp3 přehrávače a čtečky

paměťových karet. Inspiroval jsem se dokumentem USB Mass Storage Device Using a PIC MCU, zapojení bylo sestaveno přesně podle schématu, ale zprovoznit ho se zatím z neznámých důvodů nepodařilo.

**Zařízení typu CDC (communication device class):** je to speciální třída komunikačních zařízení poskytujících možnost připojení některých zařízení (např. modemu) k počítači přes USB. Jednou z možností, které poskytuje tato třída je emulace sériového portu, kdy se po připojení zařízení na počítači vytvoří virtuální sériový port. Výhodou tohoto přístupu je, že nemusíme upravovat již existující aplikace na hostitelském počítači a můžeme pracovat s vytvořeným sériovým portem tak, jako kdyby ten byl součástí PC. Podrobnější informace a popis funkcí lze najít v dokumentu Migrating Applications to USB from RS232 UART with Minimal Impact on PC Software [11].



*Obr.25: Adaptace USB zařízení pro software používající sériový port.*

Díky tomu, že použití zařízení typu **CDC** značně zjednodušuje psaní programu pro PC, byl zvolen právě tento druh komunikace.

Pro adaptaci demonstračního projektu CDC na jiný hardware a jiný typ procesoru bylo potřeba změnit nastavení součástky: Configure-> Select device-> PIC18F2550, přiřadit správný LinkerScript (18F2550.lkr), a také provést několik drobných úprav v souboru io\_cfg.h a user.c. Tamtéž byla nastavena podmínka pro napájení desky přímo z USB:

PORTAbits.RA2 self\_power 1

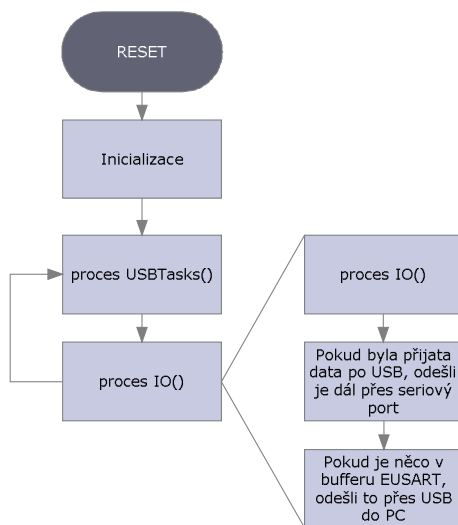


Hlavní smyčka programu se nachází v souboru main.c a vypadá následovně:

```
void main(void)
{
    InitializeSystem();
    while(1)
    {
        USBTasks();    // USB Tasks
        ProcessIO();    // See user\user.c & .h
    }
}
//end while
//end main
```

Program obsluhy přenosu dat je napsán v souboru user.c v proceduře Exercise\_Example(void). Na obr.26 je znázorněn vývojový diagram programu. Mikrokontroler průběžně kontroluje příznak naplnění přijímacího buferu modulu EUSART a příznak přijetí dat po USB. V případě přijetí dat po USB jsou tato data jednoduše přeposlána sériovému portu, a naopak. Při práci se sériovým portem mikrokontroler nevyužívá přerušení, kdežto funkce komunikace po USB – ano. Přesto procesor stíhá zpracovávat obě události: čtení dat z USB a z EUSART, současně. Je to možné díky tomu, že procesor je taktován frekvencí 48MHz, proto operace v proceduře USBTasks() a obsluha funkce getsUSBUSART() v proceduře ProcesIO() mu netrvají moc dlouho.

Vývojový diagram programu pro mikrokontroler  
v USB převodníku

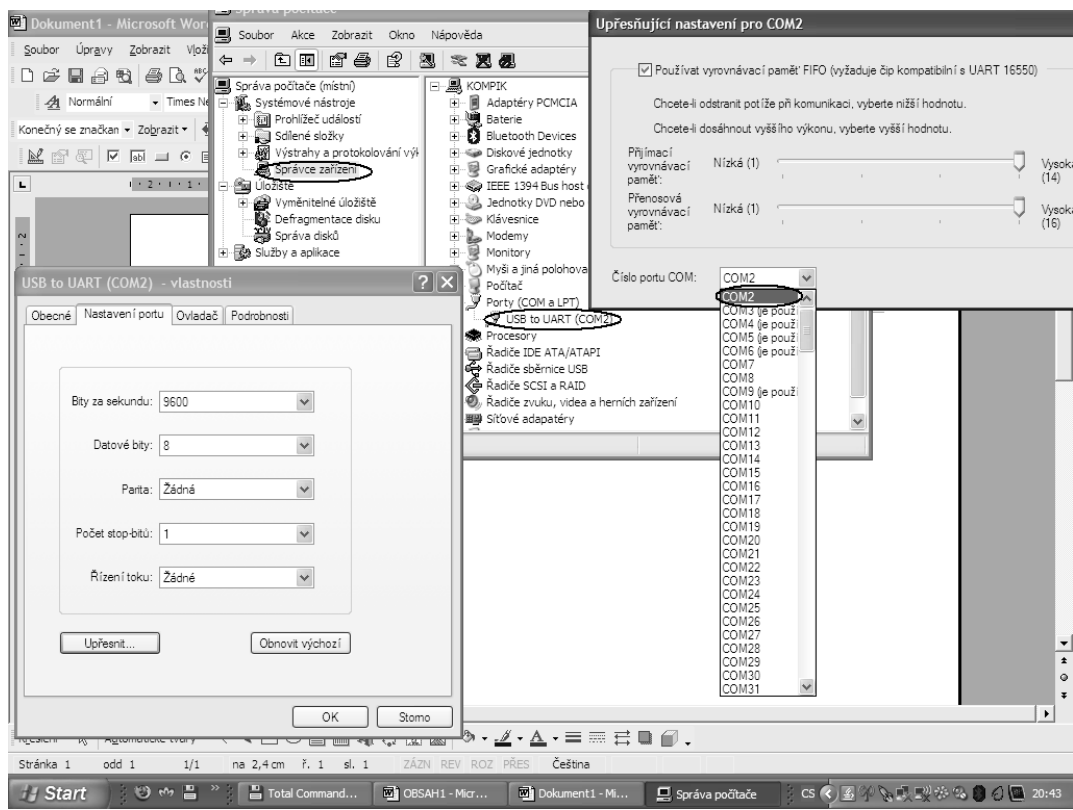


Obr.26: Vývojový diagram

## 3. Výsledky

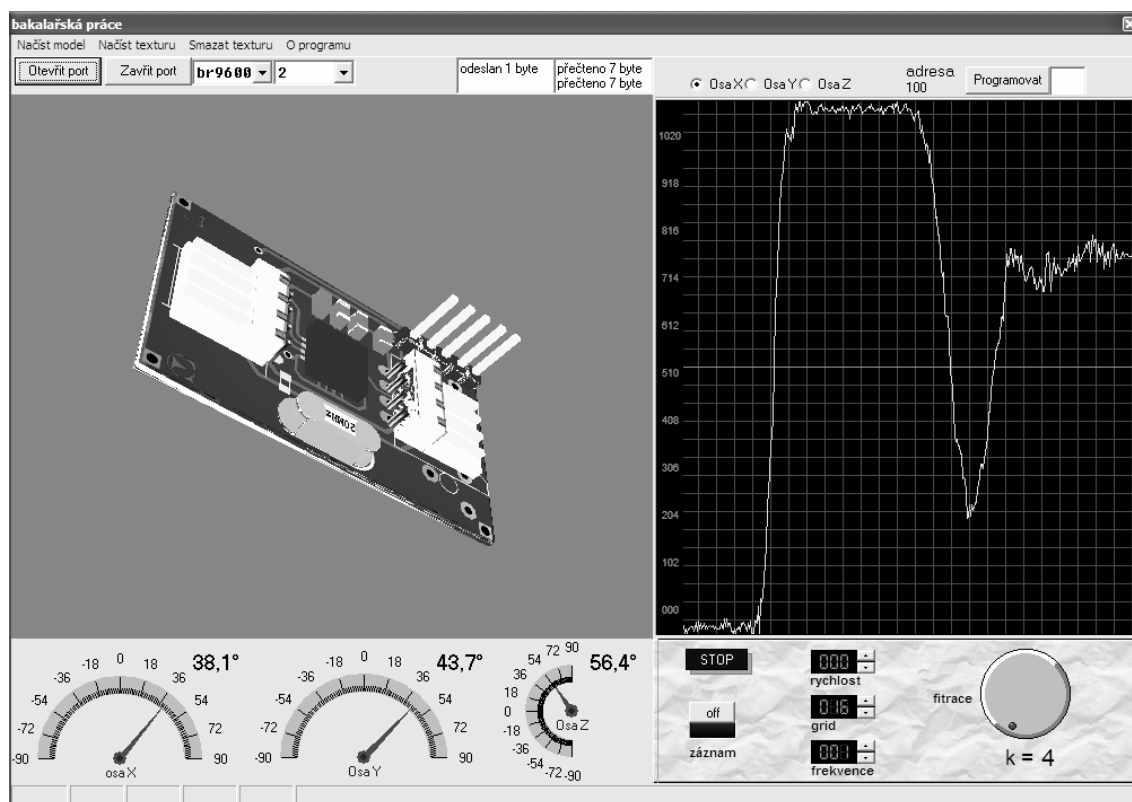
### 3.1 Popis programu pro PC

Po prvním připojení převodníku z USB, počítač nahlásí nové neznámé zařízení a měla by proběhnout instalace (ovadač má název MchpUSB.inf, a nachází se na příloženém CD). Číslo portu by mělo být v rozmezí 1 až 4, lze ho nastavit v „Tento počítač“ -> „Spravovat“ -> „Správce zařízení“ -> ve vlastnostech nainstalovaného portu -> „Nastavení portu“ -> „Upřesnit“ (obr.27).



Obr.27: Ukázka nastavení čísla portu.

Pro zpracování a vizualizaci naměřených hodnot, byl v prostředí Delphi7 vytvořen program. Na obr.28 je pohled na hlavní okno programu.



*Obr.28: Program pro předvádění měření odchylky od svislice.*

Zobrazený model, včetně textury, byl poměrně jednoduše a rychle vytvořen v trial verzi programu Autodesk 3d Studio Max. K převodu modelů s příponou \*.max do souborů \*.gms byla použita utilita Mega.ms. Tento skript načítá ze 3D modelu všechny vrcholy, plochy, normály k nim a souřadnice pro texturu a ukládá je do souboru s příponou gms. Před převodem je třeba model sjednotit funkcí Collapse All. Utilita Mega dovoluje také export animací. Na internetu lze najít spousta propracovaných, již hotových modelů, například lidská páteř na obr.14 složená z více než milionu polygonů (převod animace, poměrně výkonným počítačem, tohoto modelu z formátu \*.max do \*.gms v programu 3ds Max trval neuvěřitelných deset minut).

Pro vytvoření textury ve 3ds Maxu byla použita funkce Unwrap. Pro nakreslení textury modulu s akcerometrem byly použity obrázky desky, vytvořené ve vývojovém prostředí Eagle pomocí skriptu Eagle3D a vykreslené programem POV-Ray v3.6.

K načítání všech údajů ze souborů \*.gms slouží unita mesh.pas (s podrobným návodem k této unitě se lze seznámit v [13]).

Pro načtení souboru \*.gms s modelem, který bychom chtěli zobrazit, slouží tlačítko „**Načíst model**“, po zmačknutí se otevře dialogové okno pro otevření souboru. Tlačítka „**načíst**“ a „**smazat texturu**“ lze zapínat a vypínat zobrazování textur. Textura musí mít velikost  $n \times n$  pixelů, musí se jmenovat textura.bmp a nacházet se ve stejné složce jako program.

Po připojení přípravku a otevření příslušného portu se automaticky spustí vizualizace. Nastavení rychlosti portu je tam spíše jako formalita, protože ovladač k CDC zařízení vždy komunikuje nejvyšší dostupnou rychlostí.

Po kliknutí tlačítka „**programovat**“ modul přechází do stavu pro zápis adresy do EEPROM paměti mikrokontroleru. Adresa pokusného modulu je 100 (odpovídá písmenu ,d'), když se tato adresa změní, program přestane s daným modulem komunikovat.

Tlačítko „**záznam**“ slouží k ukládání naměřených hodnot do souboru \*.csv, který lze pak otevřít například v programu Open office nebo Excel. Záznam lze pozastavit a pak znova spustit tam, kde byl ukončen.

Tlačítkem „**start/stop**“ lze aktivovat jednoduchý osciloskop, který zobrazuje hodnoty měřené A/D převodníkem z výstupů akcelerometru. Rychlost zobrazování, velikost mřížky a frekvenci lze měnit tlačítka vedle.

Jelikož signál z akcelerometru obsahoval parazitní šumy a, i přes snahu filtrovat signál přímo na desce, příliš prudce reagoval na malé změny zrychlení, bylo nutné je odstranit. K tomuto účelu byl program doplněn filtrem. Hodnota  $k$  se nastavuje otáčením kolečka vpravo dole.

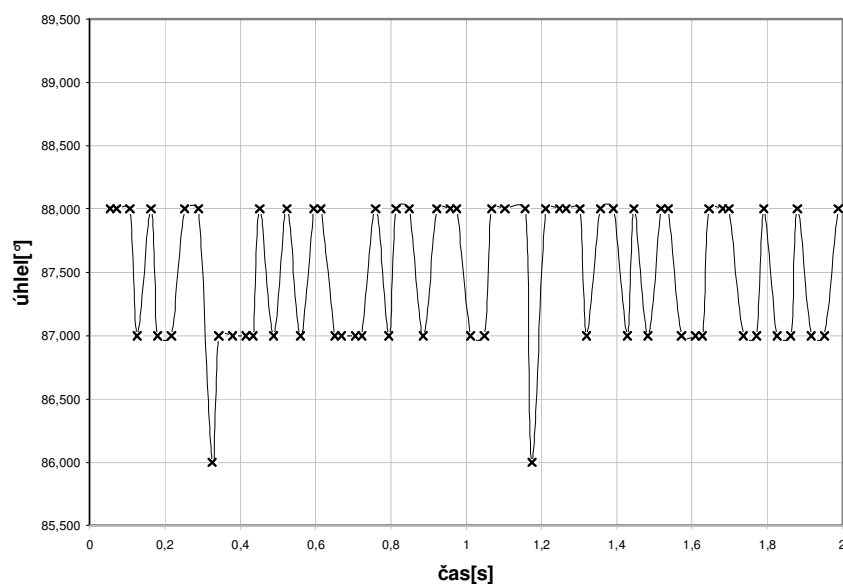
$$\text{Vztah pro výpočet filtru: } y_n = k(x_n) + (1 - k)y_{n-1}$$

## 3.2 Ukázky naměřených hodnot

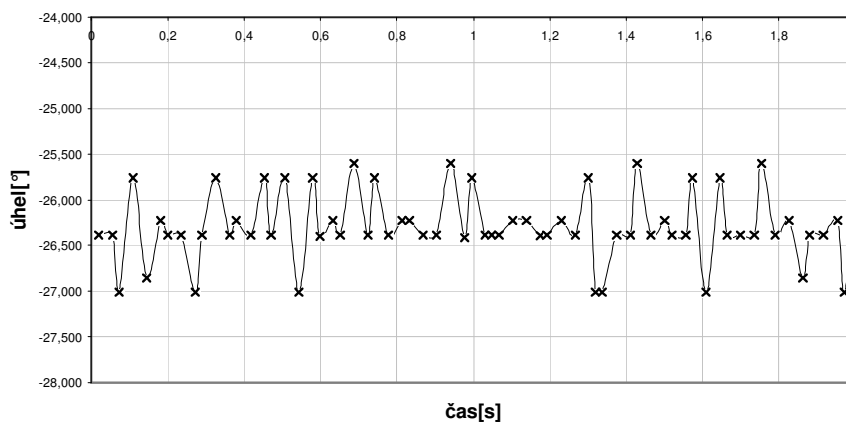
Naměřené hodnoty byly získány pomocí funkce „záznam“v demonstračním programu.

Porovnání průběhů signálu měřeného osmibitovým a desetibitovým A/D převodníky, prokázaly účelnost použití převodníku s větším rozlišením.

Signál měřený 8bitovým A/D převodníkem

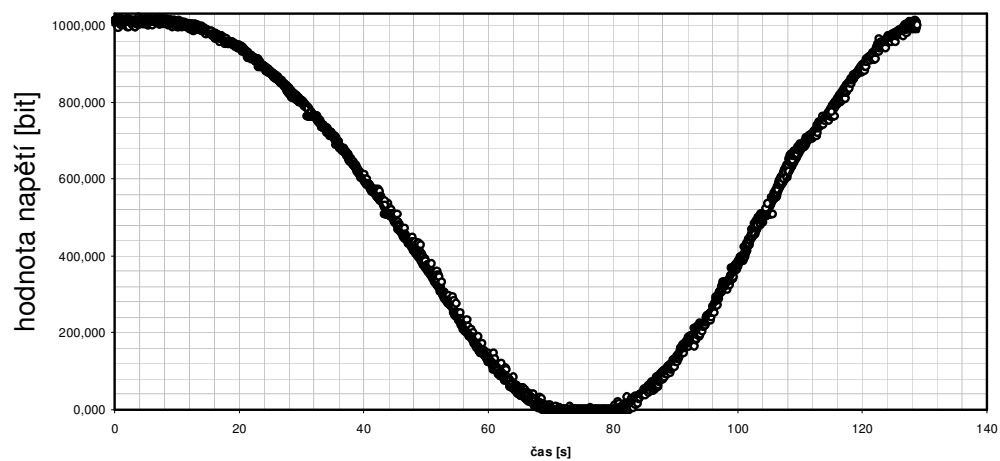


Signál měřený 10bitovým A/D převodníkem



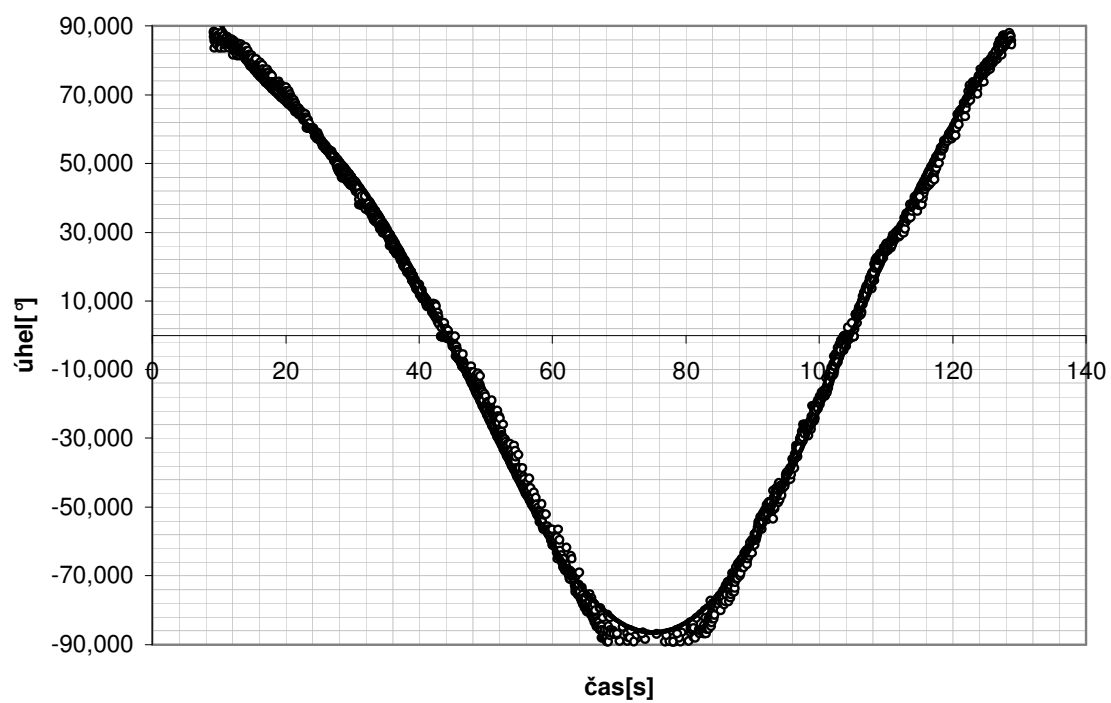
Průběh napětí při otáčení senzoru kolem osy má, dle očekávání, sinusoidální charakteristiku. Rovnoměrné otáčení desky s akcelerometrem bylo realizováno pomocí motorku od grilu.

průběh napětí na výstupu akcelerometru při rovnoměrném otáčení



Na dalším grafu jsou hodnoty napětí přepočítané na úhel, vztahem (4).

časová závislost úhlu natočení při rovnoměrném otáčení



## 4. Závěr

Pro realizaci měření odchylky od svislice byl vybrán akcelerometr MMA7260 a výsledky práce ukázali možnosti využití tohoto senzoru. Předváděcí program zobrazuje odchylku s přesností 0,3 stupně. Pro srovnání demonstrační vývojová deska Sensing Triple Axis Reference Board (STAR) od Freescale, určená pro akcelerometr MMA7260 dovoluje měření s přesností 1,5 stupně. Tato skutečnost potvrdila účelnost použití pro zpracování signálu dražšího mikrikontroleru s desetibitovým analogově-digitálním převodníkem místo osmibitového převodníku, doporučeného výrobcem. Lze říci, že pro účel filtrace signálu přímo na desce modulu by dokonce mohlo mít smysl použití, speciálně k tomu určených, signálových procesorů.

Během psaní práce firma Freescale začala nabízet zcela nové tříosé akcelerometry MMA7455L s vylepšenou mikromechanickou částí a integrovaným, spolu se senzorem, procesorem, zajišťujícím filtraci, převod signálu do digitální podoby a komunikaci s okolím po I2C nebo SPI sběrnici. Použití MMA7455L v budoucích aplikacích by značně zjednodušilo a zlevnilo celé zařízení. Také v převodníku z USB na sériovou linku by mohla připadat v úvahu možnost použití nových, vylepšených a levnějších USB mikrokontrolerů řady PIC18FXXJ50.

## 4. Seznam použité literatury

- [1] Bihlmayr, Wolfgang. g-Sensor high-brightness LED brake lamp, app. note.
- [2] Ursula, E. - Spichiger, K.: Biosensors for Medical and Biological Applications. Wiley-VCH, Weinheim 1998
- [3] Veinberg, Harvey. Analog devices micromashed products engineer: Accelerometers, fantasy and reality.
- [4] Fraden, J: Handbook of modern sensors, 2nd ed., Springer Verlag, 1997.  
URL:<books.google.cz/books>
- [5] [http://memsic.com/products/selector\\_spec.htm](http://memsic.com/products/selector_spec.htm)
- [6] Clifford, Mischelle. Measuring tilt using low-g accelerometers, app. note.
- [7] Intel Corporation, High speed USB platform design guidelines
- [8] Valenti, Chris. AN244, Internal RC oscillator calibration. URL:<[www.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00244A.pdf](http://www.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00244A.pdf)>
- [9] Ing. Federmann, Bohumil. Výrobní postupy – 3D Eagle. URL:<[www.federmann.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=75:jak-na-3d-eagle&catid=64:3d-eagle&Itemid=64](http://www.federmann.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=75:jak-na-3d-eagle&catid=64:3d-eagle&Itemid=64)>
- [10] <http://lvr.com/usbchips.htm>
- [11] Rojvanit, Rawin. AN956: Migrating Applications to USB from RS232 UART with Minimal Impact on PC Software.
- [12] [http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS\\_GET\\_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en021940](http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en021940)
- [13] Dyshlenko, Ivan. Export texturovanných 3D modelů.  
URL:<<http://www.delphikingdom.com/asp/viewitem.asp?catalogid=501>>



Husák, Miroslav. Akcelerometry. ČVUT FEL Praha.

Margelov, Aleksandr. Časopis Chip-news: Freescale semiconductor MEMS sensors.

Freescale semiconductor. Sensors device data, reference manual.

Čech, Daniel. OpenGL, referát na praktikum z informatiky.

Michael Todd Peterson. 3D Studio MAX Fundamentals.

Skála V.: Algoritmy počítačové grafiky I. - III., ZČU Plzeň

Shreiner, Dave. OpenGL Reference Manual: The Official Reference Dokument to OpenGL.

Plíva, Zdeněk. Eagle prakticky. BEN.

[freescale.com](http://freescale.com)

[analog.com](http://analog.com)

[microchip.com](http://microchip.com)

[microchip.su](http://microchip.su)

[maxim-ic.com](http://maxim-ic.com)

[www.hw.cz](http://www.hw.cz)

datasheety: PIC18F2550, MMA7260, MCP1700, MAX3471, C18 compiler, FS Demo Board.

[www.electronix.ru/forum/index.php?s=635241d55f1fc42c2f4cbbe1f92f5f6a&showtopic=25377&st=0&p=195264&#entry195264](http://www.electronix.ru/forum/index.php?s=635241d55f1fc42c2f4cbbe1f92f5f6a&showtopic=25377&st=0&p=195264&#entry195264)

[www.mcu.cz/plugins/forum/forum.php](http://www.mcu.cz/plugins/forum/forum.php)